

文章编号:1006-9941(2019)01-0079-10

# 爆炸箔起爆器作用机理研究进展

陈清畴,马 弢,李 勇

(中国工程物理研究院化工材料研究所,四川 绵阳 621999)

**摘要:** 从金属桥箔电爆炸、电爆炸驱动飞片和飞片冲击起爆炸药三个方面,综述了爆炸箔起爆器作用机理的研究进展。认为:爆炸箔起爆器在分段式电阻率模型、先进飞片测速技术、基于能量转化系数的电爆炸驱动飞片速度计算模型和基于临界起爆判据的感度预测等方面取得了重要进展,获得了一些规律性认识,一定程度上促进了其低能化设计。指出:小尺寸条件下电爆炸驱动飞片过程中的能量耗散及飞片烧蚀的定量描述、飞片在飞行中的瞬时形态、爆炸箔起爆器小尺寸装药的非理性爆轰性能预测、波阵面后微流场观测技术将成为爆炸箔起爆器未来研究的重点。

**关键词:** 爆炸箔起爆器(EFIs);电爆炸;飞片速度;飞片形态;冲击起爆

中图分类号:TJ45

文献标志码:A

DOI:10.11943/CJEM2018055

## 1 引言

近几十年来,人们对新型高安全性起爆类火工品进行了大量研究,其中最具先进性、实战化的代表是爆炸箔起爆器(Exploding Foil Initiators, EFIs)。作为第三代火工品,爆炸箔起爆器是直列式引信的重要组成部分,对提高战斗部本质安全性起着重要的作用。

爆炸箔起爆器主要由反射片、金属桥箔、飞片、加速膛及猛炸药等组成。爆炸箔起爆器在脉冲功率源提供窄脉冲大电流的作用下,使换能元金属桥箔发生电爆炸,产生冲击波和等离子内能。冲击波和等离子体内能做功剪切塑料飞片,通过加速膛加速,使飞片以数千米的速度撞击猛炸药,在炸药起爆面形成短脉冲冲击波,使炸药柱起爆并转换为爆轰输出。爆炸箔起爆器不含起爆药,仅使用猛炸药作为装药,安全性有了大幅度的提升。加速膛物理隔离换能元与药柱,使传爆序列中无须进行隔断或错位设计<sup>[1]</sup>,简化了战斗部中安装置设计。发火所需的窄脉冲大电流,在自然条

件下难以产生,使爆炸箔起爆器可以在静电、射频、电磁脉冲及杂散电流等恶劣电磁环境下保持安全<sup>[2]</sup>。爆炸箔起爆器的作用机理属于飞片冲击起爆,相对于热起爆机理的其他电雷管,其爆轰成长过程较为稳定和迅速,具有更高的发火可靠性,同时具有极佳的作用时间精度。

爆炸箔起爆器具有高安全性,广泛应用于侵彻、机载和舰载武器系统。武器系统小型化、智能化的发展,对引信提出了小尺寸、低成本的要求。而爆炸箔起爆器发火所需要的特定窄脉冲大电流使引信的体积和成本居高不下,限制了直列式引信和爆炸箔起爆器的发展。如何在保证爆炸箔起爆器可靠作用的前提下尽量降低其所需的起爆能量,已成为爆炸箔起爆器研究未来发展的关键技术<sup>[3]</sup>。而这种优化设计需要对爆炸箔起爆器作用机理有深刻认识。为此,国内外对爆炸箔起爆器作用机理开展了大量研究。

在爆炸箔起爆器研究方面,国外的研究机构有美国劳伦斯·利弗摩尔国家实验室、圣蒂亚国家实验室、荷兰TNO防务公司和英国剑桥大学等,国内有中国工程物理研究院化工材料研究所、陕西应用物理化学研究所、南京理工大学和北京理工大学等。美国发展的低能爆炸箔起爆器的起爆能量已经降低至 $0.05 \text{ J}^{[4]}$ ,与国外相比,国内存在一定的差距,爆炸箔起爆器的集成度较低,难以有效降低起爆能量,最低起爆能量为

收稿日期:2018-03-07;修回日期:2018-06-24

网络出版日期:2018-07-03

作者简介:陈清畴(1983-),男,助理研究员,主要从事新型火工品设计和爆轰数值模拟计算。e-mail: chenqingchou@caep.cn

通信联系人:李勇(1986-),男,助理研究员,主要从事半导体桥火工品研究。e-mail: liyong\_jcm@caep.cn

引用本文:陈清畴,马弢,李勇.爆炸箔起爆器作用机理研究进展[J].含能材料,2019,27(1):79-88.

CHEN Qing-chou, MA Tao, LI Yong. Research Progress in the Function Mechanism of Exploding Foil Initiator[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2019, 27(1): 79-88.

0.15 J<sup>[5]</sup>。爆炸箔起爆器作用时,将脉冲功率源提供的初始电能转化为等离子体内能,等离子体做功使其内能转化为飞片动能,再由飞片动能转化为炸药的爆轰输出。不同能量之间的转化对应于爆炸箔起爆器发火的三个相互紧密联系的过程:金属桥箔电爆炸,电爆炸驱动飞片和飞片冲击起爆炸药。对于爆炸箔起爆器的作用机理研究主要针对起爆能量的转化机制、飞片速度及形态的建模与预测、装药的飞片冲击起爆反应等三个方面展开。

本文结合国内外爆炸箔起爆器作用机理的研究进展,主要梳理了爆炸箔起爆器在金属桥箔电爆炸性能、电爆炸驱动飞片和飞片冲击起爆炸药等三个方面的研究热点,指出了在降低爆炸箔起爆器起爆能量方面的研究方向和发展趋势。

## 2 金属桥箔电爆炸研究

金属桥箔电爆炸过程包含了金属由固态经过液态、气态向等离子态转化的复杂物态变化过程,也是电能转化为等离子体内能的能量转化过程。准确计算金属桥箔上沉积的能量是研究电爆炸驱动飞片过程的前提条件。

桥箔电爆炸放电回路包括电容、开关、金属桥箔和回路四部分组成,放电回路等效简化模型如图 1c 所示。由于电容放电过程是高频振荡,回路中会存在一定的分布电感,因此放电回路可简化成由初始电阻  $R_0$ 、桥箔电阻  $R(t)$ 、回路电感  $L_0$ 、电容  $C_0$  和开关  $S$  等组

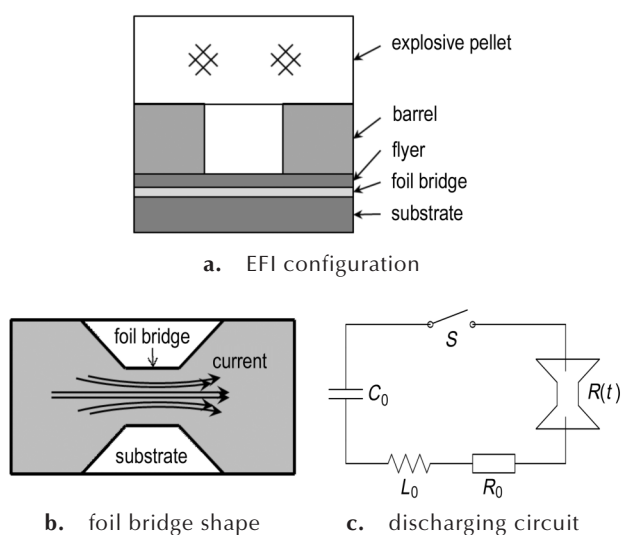


图 1 爆炸箔起爆器、桥箔和等效放电电路示意图

Fig. 1 Simplified schematic diagram of EFI, foil bridge shape, the equivalent discharging circuit

成的基本 RCL 电路。

桥箔电爆炸的基本特征是桥箔体积迅速膨胀,同时其欧姆电阻增长几个数量级,这种电阻增长是非线性的,其电阻变化与输入电流、金属材料和电路参数等因素有关。桥箔电爆炸放电回路属于含动态电阻元件的基本 RCL 电路,由基尔霍夫定律可得:

$$U_0 = L_0 \frac{dI(t)}{dt} + \frac{1}{C_0} \int_0^t I(t) dt + I(t) \cdot (R_0 + R(t)) \quad (1)$$

式中,  $U_0$  为充电器的充电电压, V;  $L_0$  为回路电感, nH;  $I(t)$  为爆发电流, A;  $C_0$  为电容,  $\mu\text{F}$ ;  $R_0$  为初始电阻,  $\Omega$ ;  $R(t)$  为桥箔电阻,  $\Omega$ 。

求解式(1),可以获得放电回路中的爆发电流,进而获得桥箔的爆发电压、沉积能量。由此,金属桥箔在电爆炸过程中的非线性电阻成为了求解的关键。建立符合桥箔物理特性的电导率(电阻率)模型,可以正确描述其在脉冲电流激励下的非线性电阻特性,成为金属桥箔电爆炸特性研究的重点。

1977年, Logan<sup>[6]</sup>建立了一种与温度呈线性关系的电阻率模型,用于计算金属桥箔电爆炸过程中的爆发电流和温度分布。其电阻率  $r$  可表示为:

$$r = r_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (2)$$

式中,  $\alpha$  为温度系数;  $r_0$  为初始电阻率,  $\Omega \cdot \text{m}$ ;  $T$  为温度, K;  $T_0$  为初始温度, K。

金属处于固态或液态时,其体积膨胀很不明显,此时金属物理状态的变化可以只用一个热力学变量(温度或焓)来描述。所以, Logan 的电阻率模型可以准确计算桥箔爆发前的电流变化,而爆发后的计算结果误差较大。 Logan<sup>[7]</sup>采用 Fortran 语言编制了相应的二维计算程序。 Baginsk<sup>[8]</sup>和 Majalee<sup>[9]</sup>基于 Logan 的电阻率模型,采用有限元方法计算了金属桥箔电爆炸过程,可以获得电功率、温度和体积变化的三维分布。这些计算最重要的贡献是发现了桥箔加热的不均匀性,金属桥箔在电爆炸时,桥箔的四角先于其他区域达到熔化温度、最早爆发。

针对 Logan 的电阻率模型无法准确描述桥箔爆发后的电阻特性问题, Zentler<sup>[10]</sup>建立了一种新的电阻率模型。以爆发点为界,爆发前的电阻率模型与 Logan 建立的模型(公式(2))一致,爆发后采用新的电阻率模型:

$$r = r_b (1 + \beta) \frac{T}{T_b} + \beta \left( \frac{T_b}{T} \right)^{3/2} \quad (3)$$

式中,  $\beta$  为电离度;  $r_b$  为爆发温度 ( $T_b$ ) 时的电阻率,  $\Omega \cdot \text{m}$ ;  $T$  为温度, K;  $T_b$  为爆发温度, K。此模型考虑到了

金属物态变化引起的电阻率急剧变化,将金属桥箔的电阻率分段描述,具有一定的合理性。但是,爆发后的电阻率模型不能准确描述电阻汽化到电离过程中的急剧变化,由此计算的爆发电流有较大误差。

同时,金属桥箔电阻的精确测量为电阻率模型的改进指导了方向。Taylor<sup>[11]</sup>测量了铜丝电爆炸过程中电阻随时间的变化规律,如图2所示。

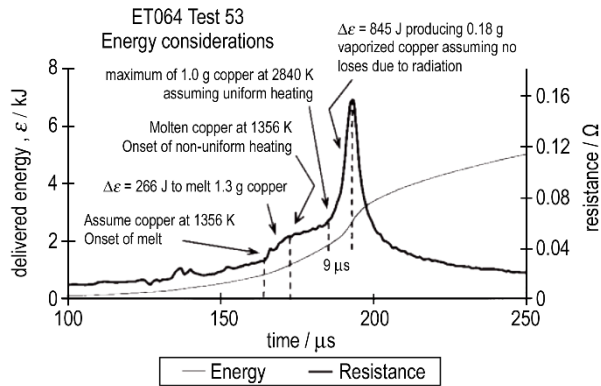


图2 爆炸桥丝沉积能量和电阻变化<sup>[11]</sup>  
**Fig.2** Discharge energy and resistance change of the exploding wire<sup>[11]</sup>

从图2可以看出,金属铜由固态向液态、气态和等离子态的变化过程。金属在不同物态条件下,具有不同的电阻特性。据此,人们开始尝试采用更为细致的分段模型来描述金属桥箔电爆炸过程的非线性电阻特性。

1975年,Tucker<sup>[12]</sup>建立一种相变模型,分阶段描述电爆炸过程的电导率。模型将电爆炸过程分为:固态加热、熔化、液态加热、气化及电弧等离子体生长等五个阶段。但是,Tucker的模型没有试验数据进行验证。2008年,赵彦等<sup>[13]</sup>分析了桥箔物态变化的物理机制,将电爆炸过程分为初始加热、本征爆炸和等离子体产生等三个阶段,如公式(4)所示。

$$\begin{cases} \sigma = \sigma_0 [1 + \alpha(T - T_0)]^{-1} & T < 3000 \text{ K} \\ \sigma = \frac{n_e}{n_a^2 \gamma_v z T} & 3000 \text{ K} \leq T < 8000 \text{ K} \\ \sigma = (n_e e^2 \tau / m_e) A^\alpha (\mu / kT) & 8000 \text{ K} \leq T \end{cases} \quad (4)$$

式中, $\sigma$ 为电导率, $\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ ;  $\sigma_0$ 为初始电导率, $\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ ;  $\alpha$ 为温度系数; $T$ 为温度,K; $T_0$ 为初始温度,K; $n_e$ 为电子密度, $\text{cm}^{-3}$ ;  $n_a$ 为原子密度, $\text{cm}^{-3}$ ;  $\gamma_v$ 为体膨胀系数与比热容之比, $\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-2}$ ;  $z$ 为离子等效电荷; $\tau$ 为电子能量弛豫时间,s; $A^\alpha (\mu / kT)$ 为费米-狄拉克积分计算的系数。采用三段式电导率模型计算的爆发电流、电压与试验结果对比,两者具有很好的一致性,说明三段式电导率

模型能够准确预估桥箔电爆炸过程的爆发电流、电压。

建立经验性的电阻率模型是解决金属电爆炸过程能量转化问题的另一种方式。1986年, Lee<sup>[14]</sup>建立了FIRESET电阻率模型。模型引入了一个中间变量:比动作量  $g$ ,可在热力学参数缺失的情况下较容易地获得。试验表明<sup>[15]</sup>,金属桥箔爆发时的比动作量  $g_0$ 为常数。模型中电阻率和比作用量的关系以高斯方程的形式表示为:

$$r(g) = A [1 - \sec h(\frac{g}{g_0})] + B \exp [(-\frac{g - g_0}{s})^2] \quad (5)$$

式中, $A$ 为爆发后电阻, $\Omega$ ;  $B$ 为电阻峰的幅值, $\Omega$ ;  $s$ 为电阻峰的宽度, $\mu\text{s}$ 。比动作量  $g$ 为:

$$g = \int_0^t j^2(t) dt \quad (6)$$

式中, $j(t)$ 为流经桥箔的电流密度, $\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$ 。  $g_0$ 和  $s$ 可由经验公式(7)计算得到。

$$g_0 = G_0 \left[ \frac{V_0}{KL} \right]^{P_0}, \quad s = s_0 \left[ \frac{V_0}{KL} \right]^{P_0} \quad (7)$$

式中, $G_0$ 、 $s_0$ 、 $K$ 、 $P_0$ 为实验拟合的常数;  $V_0$ 为充电电压,V;  $L$ 为回路电感,nH。

作为应用最为广泛的模型,FIRESET电阻率模型在计算多种金属材料的爆发电流及影响规律<sup>[16]</sup>时都取得了较好的结果。但是,金属桥箔电爆炸过程的电阻变化并不完全符合高斯分布,计算的爆发电压在爆发时间后误差较大<sup>[17]</sup>。

金属不论处于固态、液态还是等离子态,现有的理论基础已经可以准确描述金属在这些物态下的电阻变化规律。当金属汽化时其电阻趋于无限,即电阻在汽化过程中的变化具有奇异性。描述电阻在汽化过程中具有的奇异性是从理论上建立金属电爆炸过程中电阻率模型的关键。从试验结果验证来看<sup>[13]</sup>,三段式电导率模型预测金属桥箔电爆炸过程中的爆发电流、爆发电压和爆发时间都具有较好的精度,能够准确计算桥箔上沉积的电能,是准确计算飞片速度的基础。

### 3 电爆炸驱动飞片研究

#### 3.1 飞片速度理论计算

飞片速度是冲击起爆炸药的一个重要影响因素。由于爆炸箔起爆器飞片尺寸小、厚度薄、加速时间短。因此,电爆炸驱动飞片速度理论计算与测试均具有一定难度。

1975年,Tucker<sup>[18]</sup>和 Stanton<sup>[19]</sup>建立了计算飞片

最终速度的电格尼能模型:

$$u_{ft} = \left( \frac{2KJ_b^n}{1/3 + R} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

式中,  $u_{ft}$  为飞片最终速度,  $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $R$  为单位面积上的桥箔与飞片质量之比,  $J_b$  为电流密度,  $\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$ ,  $K$ 、 $n$  为仅与材料相关的常数, 称之为电格尼常数。袁士伟<sup>[20]</sup>采用电格尼能模型, 计算分析了飞片厚度、密度对飞片速度和飞片动能的影响, 认为减小飞片密度、厚度和直径有利于提高飞片速度和动能。

但是, 爆炸箔起爆器飞片尺寸仅有亚毫米量级, 边缘效应的影响破坏了飞片飞行的一维条件, 电格尼能模型计算的小飞片速度与实验值有较大误差。Schwarz<sup>[21]</sup>的试验结果表明, 飞片速度不仅与电流密度相关, 而且也与飞片直径相关。为建立飞片直径与电格尼常数的关系, 1982年, 王治平<sup>[22]</sup>给出了电格尼常数  $K$ 、 $n$  与飞片直径  $d$  的关系:

$$K = \frac{A_1}{1 - B_1/d}, \quad n = \frac{A_2}{1 - B_2/d} \quad (9)$$

式中,  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $B_1$  和  $B_2$  为常数。当飞片直径大于 3 mm 时,  $K$ 、 $n$  近似于常数, 这就退化成原电格尼能模型的一维状态。这种改进的电格尼能模型可以计算不同直径飞片的最终速度。陈军<sup>[23]</sup>拟合了更多的国外实验数据, 得到了电格尼常数  $K$ 、 $n$  与飞片直径  $d$  的二次多项式关系, 计算的精度有所提高。

电格尼能模型仅能计算飞片的最终速度。为获得飞片速度历程, Schmidt<sup>[24]</sup>用与时间相关的沉积能量代替电格尼能来计算飞片速度变化:

$$\frac{du_f(t)}{dt} = \frac{1}{3Rr_f(t)} \left[ \left( \frac{1}{3} + R \right) u_f(t)^2 + 2 \int_0^t P(t) \right] \quad (10)$$

式中,  $u_f$  为飞片速度,  $\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ ;  $r_f$  为飞片位移, mm;  $R$  为单位面积上的桥箔与飞片质量之比;  $P(t)$  为单位质量电功率,  $\text{MW} \cdot \text{mg}^{-1}$ 。由此, 通过试验测量金属桥箔电爆炸时的爆发电流和爆发电压, 计算得到电功率, 就可以获得飞片速度历程, 图 3 为 Schmidt<sup>[24]</sup>采用 (10) 式计算的飞片速度历程。

图 3 的计算结果表明, 无修正的飞片速度计算曲线明显高于实验测量曲线。这是由于计算中未考虑到冲击波、热传导、等离子体内能等因素耗散的部分电能, 电格尼能全部转化为飞片动能, 造成计算飞片速度偏高。Schmidt 增加了一个修正因子, 以表征能量耗散, 修正后只有部分电格尼能转化为飞片动能, 计算的飞片速度曲线与试验曲线一致。

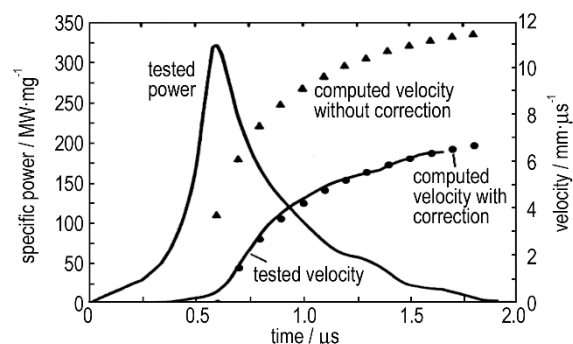


图 3 电格尼模型计算的电爆炸驱动飞片速度曲线<sup>[24]</sup>

Fig.3 Curves of the electrical explosion drive flyer velocity by the electrical Gurney method<sup>[24]</sup>

电格尼能模型为计算电爆炸驱动飞片速度提供了一种简单的计算方法。但是, 由于只考虑了能量转化过程, 该模型无法计算桥箔电爆炸驱动飞片过程中, 飞片所受压力、等离子体内能和体积等更多特征变化。1999年, 梁龙河<sup>[25]</sup>建立了一维平面不定常可压缩流体力学模型, 用于计算电爆炸驱动飞片速度。该模型将等离子体简化为理想气体, 作一维平面不定常可压缩流动。当电功率给定后, 对方程组求解即可以获得飞片速度曲线。但是, 桥箔上沉积的电功率并不能完全转化为飞片动能, 计算结果往往大于实验结果。随后曾庆轩<sup>[26]</sup>、赵彦<sup>[27]</sup>在模型中增加了能量转换系数, 计算的飞片速度曲线与实验结果一致。王桂吉<sup>[28]</sup>则给出一种与时间相关的能量转换系数, 但其在不同电压下均需要调整。

一维平面不定常可压缩流体力学模型将等离子体简化为理想气体, 但电爆炸产生的等离子体与理想气体具有一定差异。因此, 为了获得更为合理的计算结果, 有必要在计算模型中引入金属桥箔的全物态状态方程。2009年, Hrousis<sup>[29]</sup>和 Christensen<sup>[30]</sup>采用耦合了两种状态方程 (LEOS 和 GRAY) 的磁流体动力学方法建立了金属桥箔电爆炸驱动飞片冲击起爆炸药的三维模型, 计算了金属桥箔电爆炸驱动飞片速度, 此模型尝试从物理本质的角度来描述电爆炸驱动飞片过程。图 4 为 Christensen<sup>[30]</sup>采用两种状态方程的磁流体动力学模型计算的电爆炸驱动飞片速度曲线与试验结果比较。

从图 4 可以看出, 采用 LEOS 和 GRAY 两种状态方程计算的飞片速度曲线均显著高于激光干涉测速仪的测量结果。这是由于数值模拟还无法精确描述桥箔电爆炸时的冲击波、热传导、光辐射等能量耗散过程, 计算的飞片动能高于其实际飞片动能。小尺寸条件下电

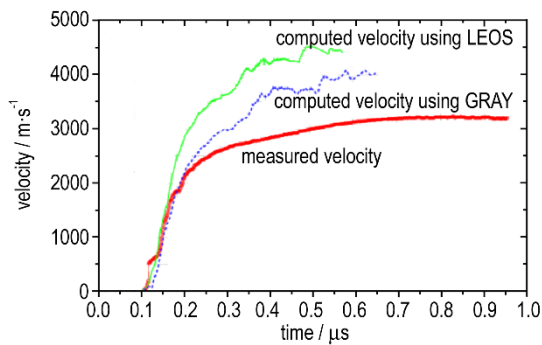


图4 电爆炸驱动飞片速度计算结果与试验结果比较<sup>[30]</sup>

Fig.4 Comparison of the calculated results and the tested ones for the electrical explosion drive flyer velocity<sup>[30]</sup>

爆炸驱动飞片过程中的能量耗散定量描述的难点依然没有解决。尽管如此,这些研究在爆炸箔起爆器数值模拟方面仍然代表了目前的最高水平。

综上所述,为了计算桥箔电爆炸驱动飞片速度,人们建立了电格尼能模型、一维平面不定常可压缩流体力学模型和磁流体动力学模型等计算方法,在一定程度上解决了飞片速度预测问题。但是,所有的计算方法都没有解决能量耗散的定量描述问题,对飞片速度的准确预估主要还是依赖于由试验标定的能量转化系数。

### 3.2 飞片速度测量

爆炸箔起爆器的飞片由于尺寸小、厚度薄,且具有一定透光性,给实验精确测量带来了困难。在激光干涉测速技术应用于爆炸箔起爆器研究之前,多采用平均速度法研究其性能。耿春余<sup>[31]</sup>建立了一种电爆炸驱动飞片的平均速度测量法,通过测量飞片到达特定位移处的时间,进而获得飞片平均速度。付秋波<sup>[32]</sup>采用平均速度测量法研究了桥箔尺寸对飞片速度的影响,结果显示,随着桥箔宽度的减小,飞片速度逐渐提高,桥箔厚度在 $3.67\ \mu\text{m}$ 时飞片速度最高。但是,平均速度测量法无法获得飞片速度与时间或位移的关系,也无法确定飞片撞击炸药的准确速度。

随着激光干涉测速技术的发展,获得飞片速度历程成为可能。1991年,Hatt<sup>[33]</sup>搭建了一套任意反射表面速度干涉仪(Velocity interferometer system for any reflector, VISAR)获得了电爆炸驱动飞片速度。随后,VISAR成为电爆炸驱动飞片速度测量的主要手段,并获得了大量规律性认识。充电电压对飞片速度有着重要影响,飞片速度和充电电压是非线性关系,随着输入能量的增加,电爆炸驱动飞片的效率逐渐降低<sup>[34]</sup>。当充电电压超过一定值时,飞片速度趋近于一

个极限值<sup>[35]</sup>。电容容量和飞片厚度对飞片速度的影响也很显著,电容越大,飞片速度越高,薄飞片速度更高<sup>[36]</sup>。随着VISAR技术的进步,可以测量的飞片直径也逐渐减小,2007年,邓向阳<sup>[37]</sup>采用VISAR成功测量了 $\Phi 0.5\ \text{mm}$ 直径飞片的速度历程。

但在VISAR测量中,需要对飞片表面进行处理以获得漫反射表面,否则很难测到有效信号。处理方法包括涂色、贴附抛光纸、镀膜和喷钢砂<sup>[33]</sup>等。这些处理方法改变了飞片状态,增加了飞片质量,使得测试用飞片与爆炸箔起爆器的飞片不一致,由此测得的飞片速度将低于实际速度。

除了VISAR外,国外常用法布里-珀罗干涉仪(Fabry-Perot interferometer, FPI)进行飞片速度测量。2007年,Prince<sup>[38]</sup>采用FPI获得了冲击片的速度历程,但其时间分辨率还有待提高,速度增长趋势并不能反映飞片的物理加速过程。Saxena<sup>[39]</sup>在研究集成开关的爆炸箔起爆器时取得了类似的结果。这说明早期的FPI精度还不能满足电爆炸驱动飞片速度的测量要求。

随着光学测速技术的发展,光子多普勒测速仪(Photonic Doppler Velocimetry, PDV)被引入到电爆炸驱动飞片速度研究中。它是一种新型激光干涉测速技术,由Strand<sup>[40]</sup>于2004年提出,这种方法改善了光信号算法,在测试中无需对飞片进行特殊处理。Hodgin<sup>[41]</sup>和陈清畴<sup>[42]</sup>采用PDV测量了小尺寸飞片( $\Phi 0.35\ \text{mm}$ )的真实速度曲线。同时,FPI的精度也逐渐提高,图5为Hodgin<sup>[41]</sup>采用FPI和PDV两种方法测量的飞片速度曲线比较。

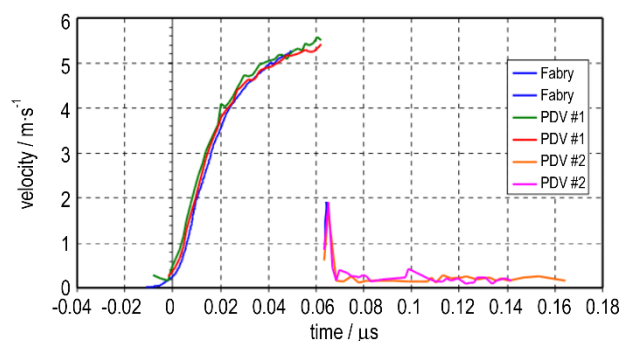


图5 FPI和PDV测量的飞片速度曲线比较<sup>[41]</sup>

Fig.5 Comparison of the flyer velocity profiles measured by FPI and PDV<sup>[41]</sup>

从图5可以看出,改进的FPI与PDV的测量精度处于同一水平。比较而言,FPI性能主要受限于法布罗标准具的腔体大小,造价昂贵,而且体积较大;而PDV性能主要受限于示波器带宽,造价便宜,且便携性好。

可以预见,PDV将成为爆炸箔起爆器飞片速度测量的主要试验手段。

在成功获得电爆炸驱动飞片速度曲线后,可以对驱动机理进行分析。从图5可以看出,电爆炸驱动飞片速度可以分为两个阶段。第一阶段飞片速度快速增加,而第二阶段飞片速度增加相对缓慢。第一阶段为冲击波驱动,金属桥箔电爆炸产生的冲击波是驱动飞片的主动力,飞片在冲击波作用下速度快速增加。采用纹影摄像技术观测到的电爆炸等离子体流场中冲击波图像<sup>[43-44]</sup>,验证了电爆炸过程会产生冲击波的推论。而第二阶段是膨胀驱动,等离子体膨胀做功是驱动飞片的主动力。随着冲击波传播,冲击波速度逐渐降低,其驱动能力也逐渐降低。而等离子体作为良导体,在电流的持续加热下,电能转化为内能并膨胀做功,驱动飞片继续加速。但由于膨胀驱动能力弱于冲击波驱动,第二阶段飞片速度增加相对缓慢。

### 3.3 飞片形态研究

在爆炸箔起爆器作用过程中,除飞片速度外,飞片撞击炸药的形态对炸药冲击起爆也有着重要影响。飞片倾斜、弯曲、破孔和边缘烧蚀等现象均会减小有效起爆面积,增大起爆能量。由于桥箔电爆炸驱动飞片的运动速度很快,尺寸又很小。因此,对飞片运动的形态观测非常困难。

1988年,Von Holle<sup>[45]</sup>通过电子转镜条纹相机,获得了飞片形状图像。结果表明,在飞片飞行过程中飞片呈马鞍形,即在垂直于电流方向飞片边缘比中心快,在平行于电流方向飞片中心比边缘快,但快的幅度较垂直方向小。回收的飞片边缘非常不规则,并有破孔出现。2002年,Murphy<sup>[46]</sup>回收了爆炸箔起爆器的飞片,其直径约为0.84 mm,同样出现了严重地烧蚀现象。这些研究给出了飞片在飞行过程中的初步图像,发现了高温等离子体对飞片的烧蚀现象。但是,限于空间分辨率不足,电子转镜条纹相机的图像不够清晰,给试验结果的判读带来了不确定性。

2016年,Willy<sup>[47]</sup>采用X光成像获得了聚氯代对二甲苯(PC)飞片在飞行中的形态照片,如图6所示。Willy认为电极与桥区界面处爆发较早,这种预爆发剪切飞片,形成了明显的飞片边界。相反,在平行于电流的方向,飞片与基底相连的时间更长,没有明显的界限。这体现出电爆炸驱动飞片形态在不同方向上的各向异性。

2017年, Sanchez<sup>[48]</sup>采用X光成像技术对比了不同材料的飞片形态特征,如图7所示。其研究结果表

明,聚酰亚胺(PI)飞片首先形成了一个气泡“bubble”,并在飞片形成过程不断拉伸,直至断裂,而PC飞片通常在几个纳秒内就与基底分离。Sanchez认为这主要是由于两种飞片材料的弹性有一定差异所致。

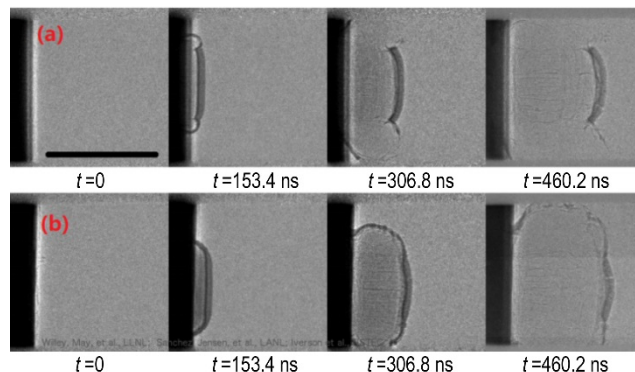
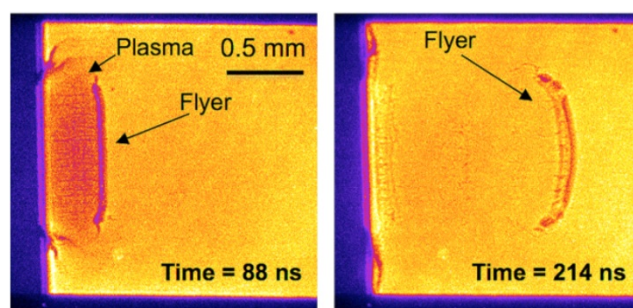
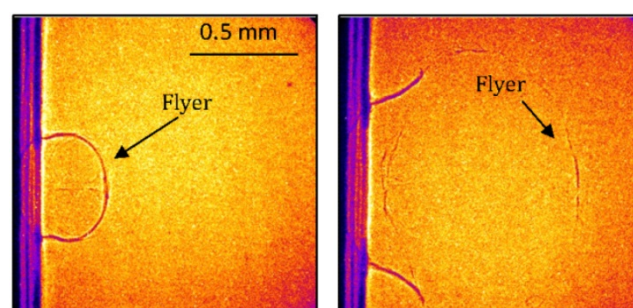


图6 采用X光成像技术获得的PC飞片形态:(a)为垂直于电流方向,(b)为平行于电流方向<sup>[47]</sup>

Fig.6 Images of PC flyer shapes obtained by X optical imaging technology: (a) perpendicular to the current direction and (b) parallel to the current direction<sup>[47]</sup>



a. PC flyer



b. PI flyer

图7 采用X光成像技术获得的不同材料飞片形态

Fig.7 Images of different material flyer shape obtained by X optical imaging technology

综上,限于观测技术的发展,飞片形态长期以来都是爆炸箔起爆器研究的难点。近几年来,国外采用X光成像技术取得了飞片形态研究的突破,给出了飞片在飞行过程中的清晰图像。而我国的X光成像技术属

于“大科学装置”,主要应用于爆轰物理<sup>[49]</sup>和惯性约束聚变<sup>[50]</sup>等方面的研究,应用于爆炸箔起爆器研究还存在着诸多困难,短期内难以取得突破。所以,尽快引入X光成像技术,对飞片形态研究有着重要意义。同时,采用光学窗口材料替代炸药,研究飞片冲击材料表面的破坏效应,反推飞片撞击时的形态,是飞片形态研究的一种新思路。

#### 4 飞片冲击起爆炸药研究

爆炸箔起爆器是由桥箔电爆炸驱动飞片高速撞击进而起爆炸药的,这种起爆方式属于冲击起爆。对于爆炸箔起爆器中飞片起爆炸药的研究,主要应用了冲击起爆的理论和试验方法。作为最重要的性能指标,爆炸箔起爆器的发火感度是研究的重点。爆炸箔起爆器发火感度的表征指标通常有发火电压、发火能量、飞片速度和冲击压力等。

采用感度试验和数理统计方法<sup>[51]</sup>获得爆炸箔起爆器的发火感度是一种易行、有效的方法。国内外采用感度试验对爆炸箔起爆器发火感度的影响规律进行了大量研究。结果表明:装药密度为90%最大理论密度<sup>[52]</sup>、炸药粒度较小<sup>[53]</sup>、圆形桥箔<sup>[54]</sup>、参数匹配<sup>[55-56]</sup>时爆炸箔起爆器的临界发火电压最低,即发火感度最高;飞片厚度、桥箔厚度、桥箔宽度对发火感度有着显著影响,在一定范围内,尺寸越小,临界发火电压越低,发火感度越高<sup>[5]</sup>;加速膛长度和桥箔的附着强度<sup>[57]</sup>对发火感度的影响较小。

感度试验需要大量的样品,以获得足够可信的数理统计结果,不利于研究的开展。Schwartz<sup>[58]</sup>将Walker<sup>[59]</sup>建立的非均质炸药临界起爆判据 $(p^n\tau)$ 引入到爆炸箔起爆器发火感度预测中。通过阻抗匹配由临界飞片速度计算撞击压力,由飞片厚度计算短脉冲持续时间,从而获得爆炸箔起爆器的临界起爆判据。Schwartz<sup>[60]</sup>采用此方法成功对以太安(PETN)和六硝基芪(HNS)等为装药的爆炸箔起爆器感度进行了预测。但是,这种方法需要通过大量试验获得不同飞片厚度下爆炸箔起爆器发火的临界飞片速度作为基础。同时,由于缺乏化学反应动力学的机理支撑,难以适应不同形式冲击下的化学反应响应。

对短脉冲冲击起爆数据的分析表明<sup>[61]</sup>,非均匀炸药的冲击起爆至少要用三个阶段来描述,即热点的成核、生长、汇合过程。1985年,Tarver<sup>[62]</sup>建立了三项式点火增长反应速率模型:

$$\frac{d\lambda}{dt} = I(1-\lambda)^b \left( \frac{\rho}{\rho_0} - 1 - a \right)^x + G_1(1-\lambda)^c \lambda^d p^y + G_2(1-\lambda)^e \lambda^g p^z \quad (8)$$

式中, $\lambda$ 为炸药反应度; $t$ 为时间, $\mu\text{s}$ ; $\rho$ 为密度, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ; $\rho_0$ 为初始密度, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ; $p$ 为压力, $\text{GPa}$ ; $I$ 、 $G_1$ 、 $G_2$ 、 $a$ 、 $b$ 、 $x$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $y$ 、 $e$ 、 $g$ 和 $z$ 是常数。第一项代表部分炸药在冲击压缩下被点火,第二项代表炸药快速反应产生 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{N}_2$ 等气体产物,第三项代表在主要反应后相对缓慢的扩散控制反应。采用该模型进行数值模拟计算,既能重现持续压力作用下冲击起爆过程,又能重现短脉冲试验结果。因此,三项式点火增长反应速率模型能够预测爆炸箔起爆器发火过程的爆轰建立。

但是,由于小尺寸炸药反应流场难以精确测定,爆炸箔起爆器装药的点火增长模型参数长期处于空白。2009年,May<sup>[63]</sup>通过起爆炸药的临界飞片速度拟合了以PETN为基的LX-16炸药的点火增长模型参数。2010年,Tarver<sup>[64]</sup>利用HNS-IV炸药临界飞片速度和飞片厚度的关系,标定了HNS-IV炸药的点火增长模型,并成功复现了试验结果。这些研究对于精确预估PETN、HNS-IV炸药爆轰成长以及爆炸箔起爆器的发火感度有着重要意义。

由于缺乏对波阵面后流场的参数变化分析,无法得到流场中各个热力学量和反应速率历程,由临界飞片速度拟合的反应速率方程具有不确定性和应用局限性。为了解决小尺寸装药的反应流场测量问题,2017年,陈清畴<sup>[65]</sup>尝试采用PDV测量飞片冲击起爆时HNS-IV炸药/窗口界面粒子速度的方法,获得不同位置处炸药爆轰成长的粒子速度变化,由此表征HNS-IV炸药反应流场特性,拟合了HNS-IV炸药的点火增长模型参数。

爆炸箔起爆器装药的反应速率方程建立,为预测其冲击起爆的临界状态即发火感度提供了理论基础,可以模拟计算不同参数爆炸箔起爆器的临界飞片速度,进而反推出其临界发火电压。但是,由于爆炸箔起爆器装药的尺寸小,非理想特性显著,其反应流场观测还存在很大的不确定性。因此,高精度的非理想反应流场观测技术成为爆炸箔起爆器飞片起爆研究的重要发展方向。

#### 5 结论与展望

爆炸箔起爆器经过数十年的发展,对其作用机理已经有了较为完整的认识,可以做到对其主要性能的

初步预测。同时,也存在着一些难点需要进一步攻克。

(1)目前,国内外建立的电阻率模型,通过分段描述电阻在汽化过程中的奇异性,能够较为准确计算电爆炸过程中的爆发电流、爆发电压和沉积能量的变化,满足爆炸箔起爆器电性能预测和优化的要求,研究热度将逐渐降低。

(2)PDV等先进测速技术的发展,解决了爆炸箔起爆器的小尺寸飞片速度准确测量问题。依赖于由试验标定的能量转化系数,初步建立了电爆炸驱动飞片速度的计算模型,在一定程度上满足了爆炸箔起爆器的飞片速度预测的需求。但是,小尺寸条件下电爆炸驱动飞片过程中的能量耗散定量描述的难点依然没有根本解决,这将成为爆炸箔起爆器未来研究的重点之一。

(3)在飞片形态研究方面,国内与美国相比还有较大差距。美国采用X光成像技术取得了飞片形态研究的突破,给出了飞片在飞行过程中的清晰图像。而我国在此领域还属于空白,需要进一步深入研究。同时,飞片受到高温等离子体的烧蚀作用,带来了炸药冲击起爆的不确定性。飞片烧蚀的定量描述将成为爆炸箔起爆器未来研究的重点之一。

(4)限于测试分析精度,爆炸箔起爆器装药的爆轰成长试验测量和反应速率模型建立都缺乏有效的支撑。爆炸箔起爆器小尺寸装药的非理性爆轰性能预测、波阵面后微流场观测技术将成为爆炸箔起爆器飞片起爆未来研究的重点之一。

#### 参考文献:

- [1] Nappert L. A exploding foil initiator system [R]. DREV-R-9502, Canada: 1996.
- [2] 杨振英, 马思孝, 褚恩义. 爆炸箔起爆器的设计及影响因素试验[J]. 火工品, 1999(4): 18-22.  
YANG Zhen-ying, MA Si-xiao, CHU En-yi, et al. Design and influence factors of exploding foil initiators[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 1999(4): 18-22.
- [3] Prinse W, Scholtes G. A Development platform for a microchip EFI [C] // 52nd Annual Fuze Conference. Kansas City, USA. 2008, 3:13-15.
- [4] Nguyen C Q, Genberg S, Cheung C. High-G mortar electronic S&A demonstration [C] // 50th Annual Fuze Conference. Norfolk, USA. 2006:11.
- [5] CHEN Qing-chou, FU Qiu-bo, CHEN Lang, et al. Parametric influences on the sensitivity of exploding foil initiators[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2014, 39(4): 558-562.
- [6] Logan J D, Lee R S, Weingart R C, et al. The calculation of heating and burst phenomena in electrically exploded foils[J]. *Journal of Applied Physics*. 1977, 48(2): 621-628.
- [7] Logan J D, Lee R S. EBF1: a computer simulation of the pre-burst behavior of electrically heated exploding foils [R]. SAND-75-0041. California, USA: 1976.
- [8] Baginski M E, Shaffer E C, Thomas K A, et al. Comparison of the electrodynamics of metals under the action of large electric currents[J]. *International Journal of Applied Electromagnetics & Mechanics*, 2000, 11(2):79-93.
- [9] Majalee A, Ikkurthi V R, Doiphode P, et al. Mixed 3-D/2-D simulation of an exploding foil opening switch [C]// Pulsed Power Conference. Dallas USA. 2003, 2:1359-1362.
- [10] Zentler J M. Fuze: a simple simulation model for a flyer-plate detonator system[R]. UCRL253260. California, USA: 1982.
- [11] Taylor M J. Formation of plasma around wire fragments created by electrically exploded copper wire [J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 2002, 35(7):700-709.
- [12] Tucker T J, Toth R P. EBF1: a computer code for the prediction of the behavior of electrical circuits containing exploding wire elements[R]. SAND-75-0041. Albuquerque, USA: 1975.
- [13] 赵彦, 曾庆轩, 梁琦. 电爆炸箔起爆器电导率模型研究[J]. 兵工学报, 2008, 29(8): 902-906.  
ZHAO Yan, ZENG Qing-xuan, LIANG Qi. Study of theoretical model for conductivity of electric exploding foil[J]. *Acta Armamentarii*, 2008, 29(8): 902-906.
- [14] Lee R S. An analytical model for the dynamic resistivity of electrically-exploded conductors [R]. UCRL-94649. California, USA: 1986.
- [15] Anderson G W, Neilson F W. Use of the "action integral" in exploding wire studies[M]//New York: Plenum Press. Exploding Wires. 1959.
- [16] 冯长根, 伍俊英, 陈朗. 箔起爆器电爆炸过程数值计算分析[J]. 含能材料, 2004, 12(增刊): 484-488.  
FENG Chang-gen, WU Jun-ying, CHEN Lang. Numerical simulation of electrical explosion of exploding foil initiators [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2004, 12(Suppl): 484-488.
- [17] 陈清畴, 伍俊英, 只永发, 等. 金属箔起爆器爆发规律的数值计算[J]. 北京理工大学学报, 2014, 34(6): 556-570.  
CHEN Qing-chou, WU Jun-ying, ZHI Yong-fa, et al. Calculations of size effects on metal explosion[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2014, 34(6): 556-570.
- [18] Tucker T J, Stanton P L. Electrical gurney energy: a new conception in modeling of energy transfer from electrically exploded conductors[R]. SAND75-0244. Albuquerque, USA: 1975.
- [19] Stanton P L. The acceleration of flyer plates by electrically exploding foils[R]. SAND-75-0221; Albuquerque, USA: 1976.
- [20] 袁士伟, 曾庆轩, 冯长根. 箔起爆器飞片参数设计与估算[J]. 火工品, 2003(4): 18-20.  
YUAN Shi-wei, ZENG Qing-xuan, FENG Chang-gen. The designing and estimating of flying plate parameters of slapper detonator[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2003(4): 18-20.
- [21] Schmidt S C. Study of factors which influence the shock-initiation sensitivity of hexanitrostilbene (HNS) [R]. SAND-80-2372. Albuquerque, USA: 1981.
- [22] 王治平. 飞片雷管中飞片直径对飞片速度的影响[J]. 爆炸与冲击, 1982(2): 83-86.  
WANG Zhi-ping. The effect of the diameter on the flyer velocity of a slapper detonator [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1982(2): 83-86.
- [23] 陈军, 王治平, 李涛. 小尺寸电爆炸箔推动飞片运动速度的经验计算[J]. 含能材料, 2004, 12(增刊): 463-466.



- CHEN Jun, WANG Zhi-ping, LI Tao. Empirical calculation of flyer velocity driven by small-scale electrical exploding foil[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2004, 12(Suppl.): 463-466.
- [24] Schmidt S C, Seitz W L, Wackerle J. An empirical model to compute the velocity histories of flyers driven by electrically exploding foils[R]. LA-6809. NM, USA: 1977.
- [25] 梁龙河, 范中波, 胡晓棉. 电爆炸箔加速飞片的数值模拟研究[J]. 兵工学报, 1999, 20(2): 102-107.  
LIANG Long-he, FAN Zhong-bo, HU Xiao-mian. Research on a flyer accelerated by electrically exploded metalfoil by means of numerical simulation[J]. *Acta Armamentarii*, 1999, 20(2): 102-107.
- [26] 曾庆轩, 赵彦, 梁琦. 金属箔电爆炸驱动飞片模型的设计及应用[J]. 火炸药学报, 2008, 31(6): 50-53.  
ZENG Qing-xuan, ZHAO Yan, LIANG Qi. Design and application of flyer velocity model accelerated by electric exploding foil[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2008, 31(6): 50-53.
- [27] ZHAO Yan, ZENG Qing-xuan, FENG Chang-gen. Theoretical model for calculating electric-power curves depicting accelerated flyer by exploding foil[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2010, 19(1): 8-13.
- [28] Wang Gui-Ji, Jiang Ji-Hao, Deng Xiang-Yang. Experiments and numerical simulation of small-scale slapper driven by electrical explosion[J]. *Journal of China Ordnance*, 2009, 5(2): 135-139.
- [29] Hrousis C A, Christensen J S. Progress in initiator modeling[C] // 40th international annual conference of ICT. Germany: 2009.
- [30] Christensen J S, Hrousis C A. Three-dimensional magnetohydrodynamic simulation of slapper initiation systems [R]. LLNL-CONF-425269. California, USA: 2010.
- [31] 耿春余. 一种简易测量小飞片速度的方法[J]. 科技学报, 1984 (1): 34-37.  
GENG Chun-yu. A simple method of measuring the velocity of the flyer with small size[J]. *Journal of Science and Technology*, 1984, (1): 34-37.
- [32] 付秋波, 蒋小华, 郭菲, 等. 爆炸箔尺寸对飞片速度的影响[J]. 兵工学报, 2010(4): 434-436.  
FU Qiu-bo, JIANG Xiao-hua, GUO Fei, et al. Effect of exploding foil size on flyer velocity [J]. *Acta Armamentarii*, 2010 (4): 434-436.
- [33] Hatt D J. A VISAR velocity interferometer system at MRL for slapper detonator and shockwave studies [R]. MRL-TR-91-42. Ascot Vale, Australia: 1991.
- [34] Brigham W P, Schwartz J J. Unique passive diagnostic for slapper detonators[R]. SAND-94-0246C. NM, USA: 1994.
- [35] Cutting J L, Lee R S, Hodgkin R L. Quantic Industries Inc. slapper detonator performance [R]. UCRL-ID-117787. California, USA: 1994.
- [36] Waschl J A, Hatt D J. Characterization of a small-scale exploding bridge foil flyer generator [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1993, 14(1): 785-796.
- [37] 邓向阳, 彭其先, 赵剑衡, 等. VISAR测量电爆炸箔驱动飞片速度的实验研究[J]. 火炸药学报, 2007, 30(2): 45-48.  
DENG Xiang-yang, PENG Qi-xian, ZHAO Jian-heng, et al. Experimental studies on velocity measurement of mylar flyer driven by exploding metal foils with VISAR [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2007, 30(2): 45-48.
- [38] Prinse W C, Van't Hof P G, Cheng L K, et al. High-speed velocity measurements on an EFI system [C] // 27th International Congress on High-Speed Photography and Photonics. Xi'an, China, 2007.
- [39] Saxena A K, Kaushik T C, Goswami M P, et al. Printed circuit board based electrically triggered compact rail gap switch [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010, 81 (5) : 056106-1~056106-4
- [40] Strand T, Berzins L V, Goosman D R. Velocimetry using heterodyne techniques [R]. UCRL-CONF-206034: 2004.
- [41] Hodgkin R, May C, Hanks R, et al. Fabry-Perot/PDV Comparison [R]. UCRL-CONF-230794. California, USA: 2007.
- [42] 陈清畴, 陈朗, 覃文志. PDV方法测量电爆炸驱动小飞片速度 [J]. 含能材料, 2014, 22(3): 413-416.  
CHEN Qing-chou, CHEN Lang, QIN Wen-zhi. Photonic Doppler velocimetry of mini flyers driven by electrically exploded foils [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2014, 22(3): 413-416.
- [43] 伍俊英, 陈朗, 王飞, 等. 金属桥箔电爆炸等离子体流场实验研究 [J]. 北京理工大学学报, 2011, 31(1): 1-4.  
WU Jun-ying, CHEN Lang, WANG Fei, et al. Experimental study of plasma evolution produced by metal bridge foil exploding [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2011, 31(1): 1-4.
- [44] Murphy M J, Adrian R J. Particle response to shock waves in solids: dynamic witness plate/PIV method for detonations [J]. *Experiments in Fluids*. 2007, 43(2-3): 163-171.
- [45] Von Holle W G, Lee R E, Chau H. New diagnostics for the characterization of slapper detonators [R]. UCRL-53856. California, USA: 1988.
- [46] Murphy M J. Optical diagnostic techniques for measuring flows produced by micro-detonators [D]. Urbana USA: the University of Illinois. 2005.
- [47] Willey T M, Champley K, Hodgkin R, et al. X-ray imaging and 3D reconstruction of in-flight exploding foil initiator flyers [J]. *Journal of Applied Physics*, 2016, 119(23): 235901.
- [48] Sanchez N J, Jensen B J, Neal W E, et al. Dynamic exploding foil initiator imaging at the advanced photon source [R]. LA-UR-17-28049. NM USA: 2017.
- [49] 任国武, 温上捷, 张茹, 等. 约束层对金属柱壳膨胀变形影响的数值模拟 [J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(6): 946-951.  
REN Guo-wu, WEN Shang-jie, ZHANG Ru, et al. Numerical simulation of influence of constrained layer on expanding deformation of metal cylindrical shell [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(6): 946-951.
- [50] 郭亮, 李三伟, 李欣, 等. ICF黑腔金泡等离子体运动研究取得进展 [J]. 强激光与粒子束, 2017, 29(12): 9-10.  
GUO Liang, LI San-wei, LI Xin, et al. Study on movement of gold bubble plasma in hohlraum [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2017, 29(12): 9-10.
- [51] 中华人民共和国国家军用标准. GJB-Z377A-1994: 感性试验用数理统计方法 [S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 1994.
- [52] 同红海, 褚恩义, 任西, 等. 装药参数对爆炸箔起爆器性能的影响 [J]. 含能材料, 2009, 17(2): 218-223.  
TONG Hong-hai, CHU En-yi, REN Xi, et al. Effect of charge parameters on the performance of exploding foil initiator [J].

- Chinese Journal of Energetic Materials (HannengCailiao)*, 2009, 17(2): 218-223.
- [53] 王培勇, 史春红, 张周梅. 高纯HNS粒度对冲击片起爆感度的影响研究[J]. 火工品, 2011(4): 29-31.  
WANG Pei-yong, SHI Chun-hong, ZHANG Zhou-mei, et al. Effect of particle size of high purity HNS on initiation sensitivity of slapper[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2011(4): 29-31.
- [54] 钱勇, 褚恩义, 谢高第, 等. 三种爆炸箔桥形状的比较分析[J]. 兵工学报, 2009, 30(2): 217-221.  
QIAN Yong, CHU En-yi, XIE Gao-di, et al. The optimization design of exploding foil bridge shape[J]. *Acta Armamentarii*, 2009, 30(2): 217-221.
- [55] 付秋波, 郭菲, 只永发. 小尺寸爆炸箔与炮筒匹配研究[J]. 弹箭与制导学报, 2010, 30(2): 114-116.  
FU Qiu-bo, GUO Fei, ZHI Yong-fa. Matching experiment of small scale exploding foil with barrel[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2010, 30(2): 114-116.
- [56] 张玉若, 金丽, 高艳, 等. 爆炸箔特征参数匹配关系研究[J]. 火工品, 2011(1): 20-22.  
ZHANG Yu-ruo, JIN Li, GAO Yan, et al. Study on matching relationship of characteristic parameter of exploding foil[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2011(1): 20-22.
- [57] Hwang J S, Lee M H, Lee S M. A study on the factors affecting the firing sensitivity of exploding foil initiator[C]//31st International Pyrotechnics Seminar. Fort Collins, USA. 2004.
- [58] Schwarz A C. Shock initiation sensitivity of hexanitrostilbene (HNS)[R]. SAND-81-0016C: 1981.
- [59] Walker F E, Wasley R J. Critical energy for the shock initiation of heterogeneous explosives [J]. *Explosive Stoffe*, 1969, 17(1): 9-14.
- [60] Schwarz A C. New technique for determining the shock initiation sensitivity of explosives[R]. SAND-77-0416C: 1977.
- [61] 孙承伟, 卫玉章, 周之奎. 应用爆轰物理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000:364.
- [62] Tarver C M, Hallquist J O, Erickson L.M. Modeling short pulse duration shock initiation of solid explosives[R]. UCRL-91484: 1985.
- [63] May C M, Tarver C M. Modeling short shock pulse duration initiation of LX-16 and LX-10 charges[R]. LLNL-PROC-414030. California, USA: 2009.
- [64] Tarver C M, Chidester S K. Ignition and growth modeling of short pulse shock initiation experiments on fine particle Hexanitrostilbene (HNS) [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, 500(5): 052044.
- [65] 陈清畴. 爆炸箔起爆器作用特征及影响规律研究[D]. 北京: 北京理工大学. 2017.  
CHEN Qing-chou. Function characteristic and influence of exploding foil initiators[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology. 2017.

## Research Progress in the Function Mechanism of Exploding Foil Initiator

CHEN Qing-chou, MA Tao, LI Yong

(Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621999, China)

**Abstract:** From three aspects of metal foil bridge electrical explosion, electrical explosion drive flyer and flyer shock initiation explosive, the research progress in the function mechanism of exploding foil initiators was reviewed. It is considered that the exploding foil initiators have made important progress in the sectional resistivity model, advanced flyer velocity measurement technology, calculation model of the electrical explosion drive flyer velocity based on the energy conversion coefficient and the sensitivity prediction based on the critical initiation criterion etc aspects. Some regular knowledges have been obtained and the low energy design is promoted to some extent. It is pointed out that the quantitative description of energy dissipation and flyer ablation, temporal shape of the flyer in the flight, non-ideal detonation performance prediction at small scale and the micro reaction flow observation technology after the wave front will become the key points in the future research of exploding foil initiators in the electrical explosion drive flyer process under the small size condition.

**Key words:** exploding foil initiators(EFIs); electrical explosion; flyer velocity; flyer shape; shock initiation

**CLC number:** TJ45

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2018055